

М 245370
Министерство высшего и среднего специального образования СССР
Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

БЕЛОВ
Виталий Митрофанович

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА
В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ
ИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛОВЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА СТЕНКЕ
диссертация написана на русском языке

(Специальность - 05.14.05 - Теоретические основы
теплотехники)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им.
Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - _____
кандидат технических наук, доцент Е.В. Шишов.

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук, профессор П.М. Брдлик
(МЛТИ).
2. Кандидат технических наук, доцент В.И. Солонин
(МВТУ).

Ведущее предприятие - Институт Теплофизики СО АН СССР.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1976 г.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1976 г.
на заседании специализированного Совета по тепловым маши-
нам и теоретическим основам теплотехники в МВТУ им. Н.Э.
Баумана, _____ кая ул.,
д. _____

_____, заве-
адресу.

еке

Манушин

I-10

M 295370

406. Тир. 100

Современное развитие техники связано с созданием все более мощных энергетических установок, таких как МГД-генераторов электроэнергии, камеры сгорания РД, ракетные двигатели, ядерные реакторы и т.п. В этом комплексе задач важное значение приобретает вопросы тепловой защиты элементов конструкций от воздействия высокотемпературных потоков газа. Наиболее распространенным способом тепловой защиты поверхностей в настоящее время является завесное охлаждение, эффективность которого максимальна в начальном участке, т.е. в области резкого изменения тепловых граничных условий на стенке.

Существующие методы расчета теплообмена в области тепловой завесы основаны на ряде упрощающих предположений и допущений, которые требуют экспериментальной проверки в указанной области. Создание новых полуэмпирических методов расчета турбулентного пограничного слоя, использующих наряду с обычными дифференциальными уравнениями движения, энтальпии и сплошности, дифференциальные уравнения переноса таких турбулентных характеристик, как интенсивность турбулентности и ее масштаба, вихревой турбулентной вязкости, напряжения турбулентного трения, турбулентного теплового потока вызывает необходимость более глубокого экспериментального изучения флуктуационной структуры турбулентных течений.

Исследование теплообмена в области тепловой завесы проводилось Волчковым Э.П., Лебедевым В.П., Комаровым В.П., Леонтьевым А.И., *Nishiwaki N., Tsuchida A., Hirata M., Reynolds W.C., Kays W.M., Kline S. J.* и др. Надо отметить, что все исследования проводились на значительном расстоянии от ступенчатого изменения тепловых граничных условий на стенке, где эффективность завесы незначительна, в то время как наибольший интерес в реальных условиях представляет область, непосредственно примыкающая к месту ступенчатого изменения тепловых граничных условий, в которой результаты расчета теплообмена по известным методикам дают значения, расходящиеся между собой более чем на 200%. Отсутствие экспериментальных данных как по распределениям средних, так и пульсационных характеристик теплового турбулентного пограничного слоя в начальном участке тепловой завесы не позволяет проверить справедливость исходных предположений и допущений (консервативность закона теплообмена, универсальность распределения P_z , в сечении пограничного слоя, возможность



представления профиля избыточных температур степенной зависимости с постоянным показателем и т.д.), положенных в основу существующих методов расчета теплообмена в области завесы.

Предметом диссертации является экспериментальное исследование теплообмена в области, непосредственно примыкающей к ступенчатому изменению теплового потока на стенке.

Диссертация состоит из пяти глав. В первой главе дается анализ опубликованных работ по исследованию теплообмена в турбулентном пограничном слое на непроницаемой пластине при изменяющихся тепловых граничных условиях. Вторая глава содержит описание экспериментальной установки, тепловой пластины, измерительной аппаратуры и методики измерений.

Эксперименты проводились в МВТУ им. Н.Э. Баумана на специально спроектированной дозвуковой аэродинамической трубе прямого действия с закрытым рабочим участком, работающей на принципе всасывания. При проектировании аэродинамической трубы особое внимание обращалось на получение в ядре потока равномерного пространственного поля скорости с малой и по возможности изотропной степенью турбулентности. Сопло прямоугольной формы сечения выполнено из древесины и имеет тринадцатикратное равномерное поджатие. Перед соплом установлен коллектор, на который натянут пылезадерживающий фильтр. Между коллектором и соплом установлен хонейкомб с размером ячейки 20×20 мм при длине ячейки 200 мм для разрушения крупномасштабных вихрей. За хонейкомбом установлено пять сеток с ячейкой 2×2 мм, изготовленных из нержавеющей проволоки диаметром 0,35 мм, позволивших создать низкую изотропную турбулентность в ядре потока.

На выходе сопло плавно переходит в рабочую часть сечением 300×500 мм. Длина рабочей части равнялась 3000 мм. Конструкция рабочей части позволяла измерять оптическими методами местоположение чувствительных элементов датчиков, а задняя стенка рабочей части трубы позволяла плавно изменять сечение рабочего участка, что необходимо для получения заданного распределения скорости в ядре потока вдоль тепловой пластины.

К рабочему участку жестко крепится диффузор, который через эластичное соединение связан с переходником вентилятора, что позволяет исключать передачу вибраций от вентилятора к рабочей части.

Тепловая пластина представляет собой переднюю стенку ра-

бочего участка аэродинамической трубы размером 500x2100 мм, на которой развивается изучаемый турбулентный пограничный слой. Нагревательный элемент разделен по длине пластины на четыре части, каждая из которых имеет независимое электрическое питание. Регулирование мощности, подводимой к нагревателям каждой секции осуществлялось трансформаторами типа ЛАТР-2 и контролировалось ваттметрами Д5004/3. Обладая малой тепловой инерционностью и практически отсутствием растекания тепла в продольном направлении вследствие малой теплопроводности используемого материала, такая конструкция пластины позволяет достаточно точно воспроизводить как случай постоянного по длине теплового потока, так и ступенчатую тепловую нагрузку.

Для измерения распределения температуры вдоль средней линии пластины в ее поверхность заделаны заподлицо 30 проволочных термопар хромель-копель диаметром 0,2 мм, спаенных встык серебряным припоем (Рис.1). ЭДС термопар регистрировалась потенциометром Р-309, класса 0,005. Тепловая пластина снабжена также отверстиями для отбора статического давления. Перепад давлений измерялся с помощью дифференциального наклонного микроманометра типа ЦАГИ с отсчетом по измерительному микроскопу с точностью 0,01 мм H₂O.

Измерения динамических и тепловых характеристик в сечении пограничного слоя проводились с помощью термоанемометрической аппаратуры фирмы "ДИСА-электроник".

В третьей главе диссертации проводится анализ погрешностей измерений и обработки опытных данных. Приводится оценка погрешности измерений, вызванная недостаточным пространственным разрешением датчиков термоанемометра, погрешности динамических измерений методом "нагретой нити" при изменении температуры потока. Проведенная оценка случайных погрешностей показала, что характеристики пограничного слоя измерялись со следующей точностью: $\bar{u}$ - 4,2%, u' - 5,2%, $\bar{T}$ - 2,5%, T' - 3,5%, St - 8,6%, v'^2 - 17,5%, w'^2 - 17,5%, $\bar{u}v'$ - 9%, $\bar{v}T'$ - 11%, $P_{\tau\tau}$ - 18,5%.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального исследования теплообмена в турбулентном пограничном слое при нулевом градиенте давления и постоянном тепловом потоке на стенке. Так как характер течения в турбулентном пограничном слое существенно влияет на теплообмен пластины с потоком газа, то в данной работе уделено большое внимание получению "стандарт-

ного" двумерного турбулентного пограничного слоя. Все измерения проводились при скорости в ядре потока равной 10 м/сек. Степень турбулентности в ядре потока при этой скорости была равна 0,16%. На Рис.2 показано полученное распределение давления вдоль пластины. Измеренные профили скорости и ее пульсационные составляющие показаны на Рис.3 и Рис.4.

Подстановка интегральных характеристик динамического пограничного слоя, вычисленных по специальной программе на ЭВМ "Минск-22" по экспериментальным данным, в интегральное уравнение импульсов показало, что левая и правая части этого уравнения отличаются не более чем на 5%, что свидетельствует о двумерности течения в пограничном слое. Этот вывод подтверждается и измерениями коэффициентов корреляции $R_{u'w'}$, значения которых не превышают 0,09.

Значения напряжений трения на стенке находились методом Клаузера, по уравнению для логарифмической части профиля скорости:

$$u^* = 5,6 \lg Y^* + 4,9 \quad (1)$$

Выбранные значения коэффициентов в уравнении (1) подтверщаются измерениями турбулентного напряжения трения вблизи стенки, проведенными в настоящей работе.

В этой же главе проводилось исследование теплового турбулентного пограничного слоя, развивающегося при постоянном подводе тепла на стенке. Тепловой поток на стенке определялся по наклону профиля температуры в области вязкого подслоя ($Y^* < 5$). Этот способ определения теплового потока на стенке позволял исключить ошибки, связанные с потерей тепла за счет теплопроводности пластины. Вычисленные значения чисел St по интегральному уравнению энергии отличаются от значений, вычисленных по наклону профиля температуры в вязком подслое, не более чем на 5%. По найденным значениям теплового потока на стенке и известным значениям скорости и температурного напора находились локальные значения чисел St .

На Рис.5 и Рис.6 показаны полученные распределения средней температуры и ее пульсационной составляющей в координатах стенки. На Рис.7 приведено распределение чисел St в зависимости от числа Re_{τ}^{**} , построенного по толщине потери энергии. Как видно, полученные значения хорошо совпадают с общеизвестной зависимостью:

$$St_0 = 0,0144 Re_{\tau}^{*-0,25} \quad (2)$$

справедливой для случая безградиентного обтекания пластины в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса. Проведенные измерения позволили проверить надежность выбранной методики измерений, а также получить "стандартные" характеристики турбулентного пограничного слоя.

В пятой главе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена в турбулентном пограничном слое при ступенчатом изменении тепловых граничных условий на стенке. Как показано в работах Эккерта Э.Р. и Дрейка Р.М., при расчетах теплообмена в области завесы определяющей является разность между температурой стенки при наличии завесы и температурой адиабатической стенки. Кроме того, в работах Кутателадзе С.С. и Леонтьева А.И. показано, что интегральное уравнение энергии, записанное относительно этой разности температур, сохраняет свой обычный вид:

$$\frac{d Re_{\tau}^{**}}{d \bar{x}} + \frac{Re_{\tau}^{**}}{\Delta T^{*}} \cdot \frac{d \Delta T^{*}}{d \bar{x}} = St \cdot Re_L \quad (3)$$

где: $\Delta T^{*} = T_{стg} - T_{ст00}$.

Тогда при наличии завесы, в случае консервативности закона теплообмена (2), расчет теплообмена можно вести обычным способом. Учитывая вышесказанное, в настоящей работе исследовался как случай ступенчатого подвода тепла, так и развитие теплового турбулентного пограничного слоя на адиабатической поверхности за участком теплообмена. Опыты проводились при двух длинах первого нагреваемого участка: 500 и 1600 мм. Тепло подводилось по закону $q_{cr} = const$. Значительная протяженность второго участка в первом варианте позволила проследить изменение тепловых характеристик пограничного слоя на больших расстояниях от места ступенчатого изменения теплового потока на стенке. Во втором варианте было изучено развитие теплового пограничного слоя в непосредственной окрестности ступенчатого изменения теплового потока на стенке.

На Рис.7 показано распределение чисел St в зоне тепловой завесы в зависимости от числа Re_{τ}^{**} , построенного по толщине потери энергии, подсчитанной по измеренным профилям температуры для случая ступенчатого подвода тепла с отношением тепловых

потоков $q_{ст1}/q_{ст2} = 5$. Видно, что с приближением к тепловой ступеньке числа St все больше отличаются от "стандартной" зависимости (2), стремясь к $St \sim q_{ст}/h_f$ в сечении, где имеет место ступенчатое изменение тепловых потоков.

В соответствии с методом суперпозиции, вычитание адиабатического профиля температуры, измеренного в этом же сечении при наличии одинаковых тепловых граничных условий в области, расположенной вверх по течению от места ступенчатого изменения температурных условий на стенке должно дать "нормальный" (избыточный) профиль температур. Это вычитание профилей температуры указано на Рис.8. Видно, что вблизи ступенчатого изменения теплового потока на стенке избыточные профили температуры не могут быть описаны степенной зависимостью с постоянным показателем степени. Такое поведение профиля избыточной температуры объясняется их различной толщиной по отношению к толщине динамического слоя.

По избыточным профилям температуры были вычислены значения чисел St в зависимости от числа Re_{τ}^{**} (Рис.7). Видно, что по мере приближения к ступеньке отклонение от "стандартного" закона теплообмена (2) становится весьма значительным. На Рис.7 приведены также значения чисел St , пересчитанные по значениям скорости на внешней границе слоя избыточной температуры. Такая поправка достаточно точно укладывает экспериментальные точки на "стандартную" зависимость. При подсчете числа Re_{τ}^{**} определяющая скорость та же, что и при вычислении толщины потери энергии, вследствие чего в число Re_{τ}^{**} масштаб скорости не входит. Поэтому "стандартный" закон теплообмена должен быть записан в виде:

$$St_u = A / Re_{\tau}^{**m} Pr^n \quad (4)$$

Этот вывод хорошо подтверждается и экспериментальными данными, приведенными на Рис.9 и Рис.10, где приведены распределения избыточных температур и пульсаций в координатах стенки.

По измеренным значениям величин $\bar{u}^+ \bar{v}^+$, $\bar{v}^+ \bar{t}^+$, $\bar{u}$, $\bar{t}$ были вычислены значения P_{τ} для всех исследованных случаев подвода тепла (Рис.11). Как видно, характер изменения P_{τ} на адиабатической стенке резко отличается от его изменения в пограничном слое при постоянном тепловом потоке на стенке. Если экстраполировать кривую, то создается впечатление, что при приближении к стенке P_{τ} стремится к нулю. Такое поведение P_{τ} можно качественно объяснить, если представить себе адиабатический случай как результат суперпозиции двух тепловых пограничных слоев, развивающихся

под влиянием одинаковых по величине и обратных по знаку тепловых потоков на стенке. В этом случае вихрь, проникающий в область теплового возмущения, вызванного адиабатической стенкой, все время отдает тепло со всей своей поверхности и его теплосодержание резко падает. Тот же вихрь в условиях $q_{ст} = const$ менее интенсивно обменивается теплом с окружающей жидкостью, а изменение его теплосодержания происходит в результате изменения теплового потока, пронизывающего вихрь и направленного от стенки. Характер распределения P_{2T} в области ступенчатого изменения теплового потока на стенке занимает промежуточное положение.

В работе показано, что метод суперпозиций применим не только к осредненной температуре и ее пульсациям, но и к тепловым потокам. При этом, так как распределение избыточной температуры и теплового потока в сечениях пограничного слоя подобны распределению этих характеристик в пограничном слое при постоянном тепловом потоке на стенке, то вычисленные значения P_{2T} для избыточного профиля температур совпали со значениями, полученными для случая постоянного теплового потока на стенке.

На основании анализа полученных экспериментальных данных показано, что теплообмен в начальном участке тепловой завесы можно считать, пользуясь интегральным методом, предложенным Кутателадзе С.С. и Леонтьевым А.И., с учетом результатов, полученных в настоящем исследовании. Интегральное уравнение энергии для области завесы запишется в виде:

$$\frac{d Re_{\tau}^{**}}{d \bar{x}} + \frac{Re_{\tau}^{**}}{\Delta T^{*}} \cdot \frac{d \Delta T^{*}}{d \bar{x}} = St_{u_{\tau}} \cdot Re_b \quad (5)$$

где: $Re_{\tau}^{**} = \frac{1}{\sqrt{\nu}} \int_0^{\delta} u \left(\frac{T - T_{\infty}}{T_{ct} - T_{\infty}} \right) dy$; $\Delta T^{*} = T_{ct} - T_{\infty}$; $St_{u_{\tau}} = \frac{q_{ст}}{\rho c_p u_{\tau} \Delta T^{*}}$; $Re_b = \frac{u_{\tau} \delta}{\nu}$ (6)

Только в этом случае закон теплообмена остается консервативным в условиях завесы. Аналогичное предположение было сделано Волчковым Э.П. и Левченко В.Я. После решения уравнения (5) для случая $q_{ст} = const$ с использованием степенного представления профилей скорости и избыточной температуры получены выражения для расчета изменения скорости на границе слоя избыточной температуры:

$$u_{\tau} / u_0 = [x_2 / (x_1 + x_2)]^{n/(1+2n)} \quad (7)$$

и эффективности тепловой завесы:

$$\theta = [(x_1 + x_2) / x_1]^{2n/(1+3n)} \left\{ 1 - [x_2 / (x_1 + x_2)]^{n/(1+2n)} \right\} \quad (8)$$

Сравнение результатов расчета по формуле (8) с полученными в настоящей работе экспериментальными результатами показано на Рис.12.

В заключении диссертации приводится инженерная методика расчета завесного охлаждения.

ВЫВОДЫ

1. Сконструирована и создана аэродинамическая дозвуковая труба малой турбулентности $q' \approx 0,16\%$ для исследования средних и статистических характеристик теплового турбулентного пограничного слоя, развивающегося при сложных тепловых и гидродинамических условиях.

2. Разработана методика измерения средних и пульсационных характеристик динамического и теплового турбулентного пограничного слоя с использованием термоэлектронной аппаратуры.

3. Получены подробные данные по пульсационной структуре теплового пограничного слоя, развивающегося в условиях безградиентного течения как при $q_{ст} = const$, так и в области ступенчатого изменения теплового потока на стенке. Показано, что распределение Pz_T в сечении пограничного слоя зависит от тепловых граничных условий на стенке.

4. Анализ экспериментальных результатов показал, что закон теплообмена, записанный в виде:

$$St = A / Re_T^{*m} Pz_T^n$$

остается консервативным к изменению тепловых граничных условий на стенке и в начальном участке завесы, если числа St относить к местной скорости на границе нового теплового возмущения, вызванного ступенчатым изменением теплового потока и перепаду температур $\Delta T^* = T_{ст} - T_{ст0}$. При этом числа Re_T^* следует определять по избыточной разности температур.

5. Проведенный анализ экспериментальных распределений температуры и ее пульсационной составляющей в начальном участке завесы показал, что избыточные профили средней температуры и пульсационной составляющей носят универсальный характер в координатах стенки, если числа St подсчитывать по масштабам, указанным в пункте 4. На небольших расстояниях от начала завесы ($x_2/x_1 \approx 0,03$) избыточные профили температуры не могут быть описаны универсальной степенной зависимостью с постоянным показателем степени.

6. Получено аналитическое выражение для определения эффек-

тивности завесы, хорошо совпадающее с результатами измерений. Однако на очень малых расстояниях от начала завесы ($x_2/(x_1+x_2) < 0,03$) расчет дает заниженные значения эффективности, так как допущение о том, что избыточный профиль температуры может быть описан стандартной степенной зависимостью, на этом участке не выполняется.

7. Показано, что теплообмен в начальном участке тепловой завесы, развивающейся в условиях безградиентного обтекания, можно рассчитывать по методу, предложенному Кутателадзе С.С. и Леонтьевым А.И., если учесть особенности, отмеченные в п.4, а также воспользоваться полученным аналитическим выражением для определения эффективности завесы.

Результаты работы докладывались и обсуждались:

1. на научно-технической конференции факультета "Энергомашиностроение" МВТУ им. Н.Э. Баумана, посвященной XXV съезду КПСС;
2. на Всесоюзном Симпозиуме по методам аэрофизических исследований, ИТПМ СО АН СССР, 1976 г.

Материалы диссертации изложены в статьях:

1. А.И. Леонтьев, Е.В. Шишов, В.П. Игов, В.Н. Афанасьев, В.М. Белов. Аэродинамическая установка для экспериментального исследования структуры турбулентных пограничных слоев, Труды МВТУ, № 195, 1975.

2. Е.Е. Шишов, В.П. Игов, В.Н. Афанасьев, В.М. Белов. Экспериментальное исследование турбулентного пограничного слоя на плоской пластине с нулевым градиентом давления и постоянным тепловым потоком, Док. в Центре НТИ по энергетике и электрификации Мин. энергетики и электрификации СССР - Информэнерго, № Д/175, М., 1975.

3. Е.В. Шишов, В.П. Игов, В.Н. Афанасьев, В.М. Белов. Экспериментальное исследование теплообмена в турбулентном пограничном слое в окрестности ступенчатого подвода тепла, Док. в Центре НТИ по энергетике и электрификации Мин. энергетики и электрификации СССР - Информэнерго, № Д/176, М., 1975.

4. В.Н. Афанасьев, В.М. Белов, Е.В. Шишов, В.П. Игов. Экспериментальное исследование теплообмена в области ступенчатого изменения теплового потока, Изв. ВУЗов, Машиностроение, № II, 1975.

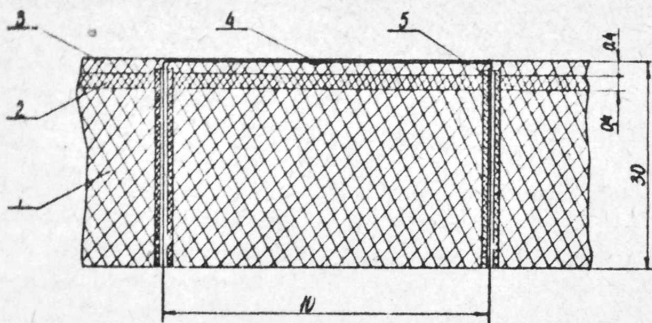


Рис.1 1- стеклопластик; 2- электронагреватель; 3- электро-изоляция; 4- термопара; 5- фарфоровая трубка.

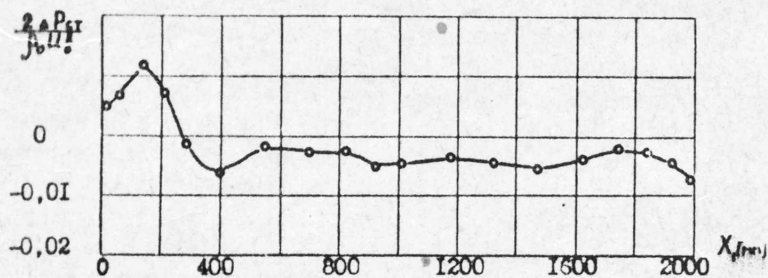


Рис.2

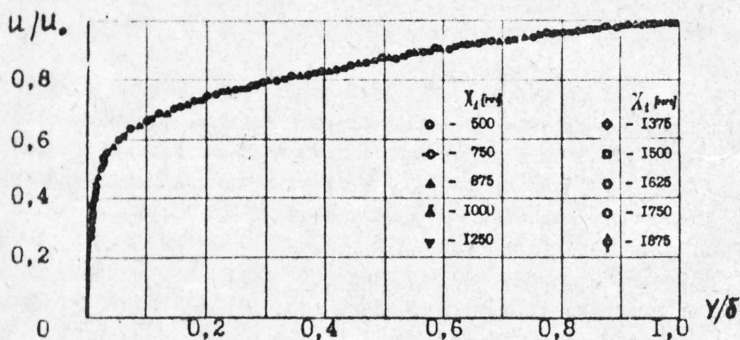


Рис.3

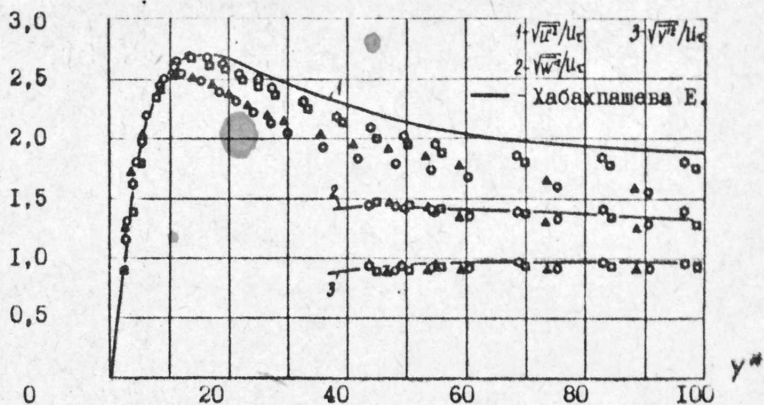


Рис.4

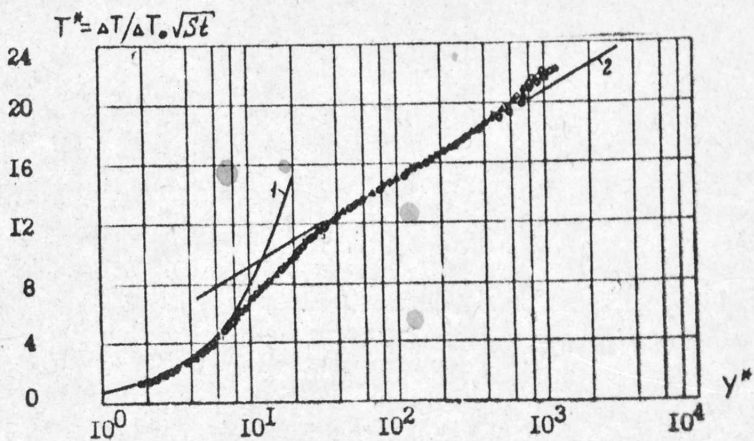


Рис.5 1- $T^* = 0.71 y^*$; 2- $T^* = 5.9 \lg y^* + 3.2$.

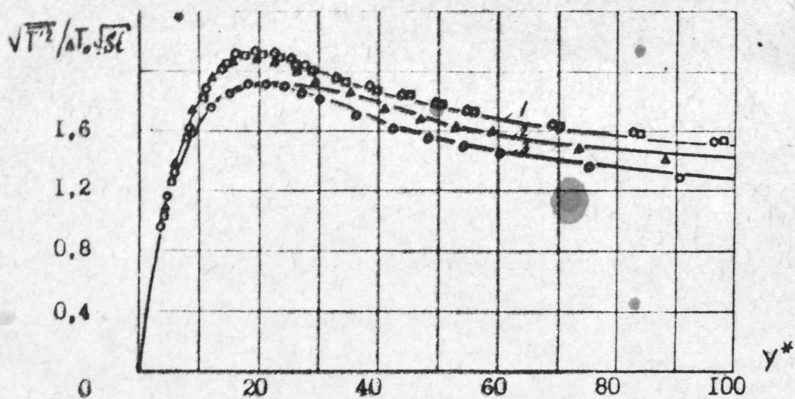


Рис.6 1-Орландо А. и др.; 2-Блом Д.; 3-Танимото С. и др.

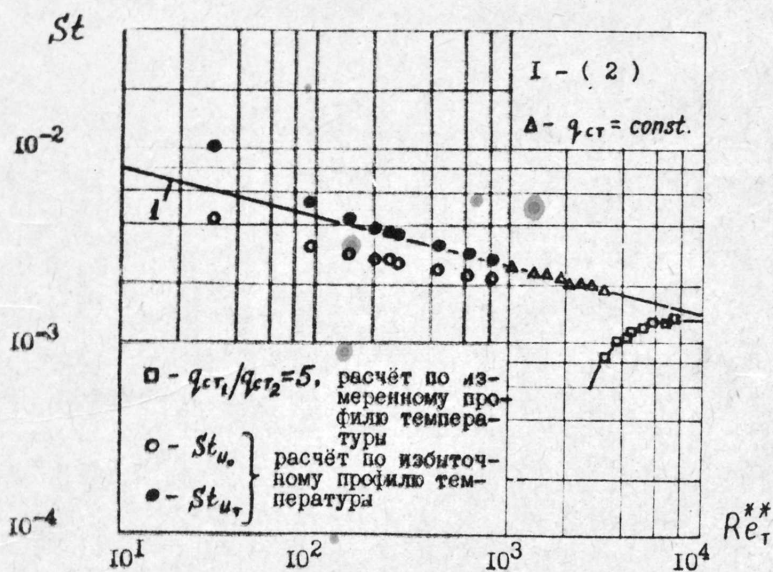


Рис.7

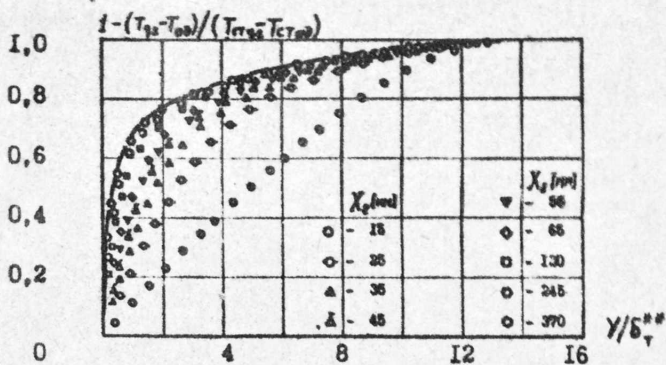


Рис. 8

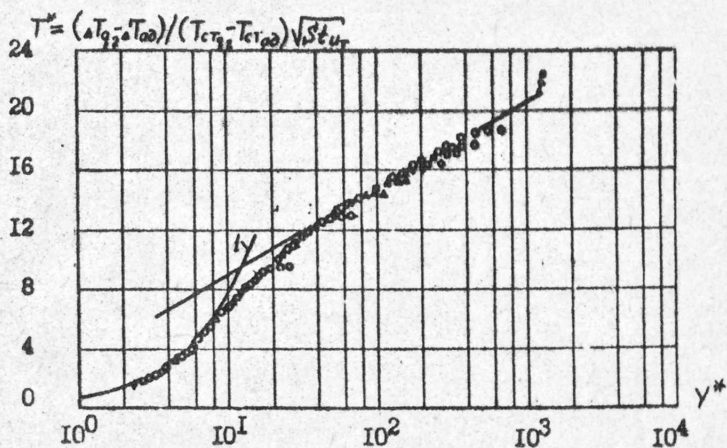


Рис. 9 1- $T^* = 0.71 y^*$; 2- $T^* = 5.9 \lg y^* + 3.2$.

